Agromine des métaux sur une friche polycontaminée

Catherine Sirguey, Emile Benizri, Guillaume Echevarria, Claire Hazotte, Julien Jacquet, Baptiste Laubie, Gaylord Erwan Machinet, Gabrielle Michaudel, Jean Louis Morel, Ramez Saad, et al.

▶ **To cite this version:**

Catherine Sirguey, Emile Benizri, Guillaume Echevarria, Claire Hazotte, Julien Jacquet, et al.. Agromine des métaux sur une friche polycontaminée. 5è Rencontres Nationales de la Recherche sur les sites et sols pollués, ATELIER 5B : Nouvelles opportunités pour de nouveaux usages, ADEME, Feb 2025, Paris, France. pp.14-19. hal-04947260

HAL Id: hal-04947260
https://hal.science/hal-04947260v1

Submitted on 14 Feb 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Open licence - etalab

AGROMINE DES METAUX SUR UNE FRICHE POLYCONTAMINEES

Retour d'expérience du projet SOLAMET

Catherine SIRGUEY[1], Emile BENIZRI[1], Guillaume ECHEVARRIA[1, 2], Claire HAZOTTE[2], Julien JACQUET[1, 2], Baptiste LAUBIE[2, 3], Gaylord MACHINET[4], Gabrielle MICHAUDEL[2], Jean-Louis MOREL[1, 2], Ramez SAAD[2], Mathieu SCHWEITZER[5], Marie-Odile SIMONNOT[3]

[1] : Université de Lorraine, INRAE, LSE, 54000, Nancy, France
[2] : Econick, 1 Rue Grandville, 54000, Nancy, France
[3] : Université de Lorraine, CNRS, LRGP, 54000, Nancy, France
[4] : Microhumus, 3 allée de Chantilly, 54500, Vandoeuvre-les-Nancy, France
[5] : Daum, 22 rue de la Trémoille, 75008, Paris, France

Résumé

L'agromine des métaux issus de sites polycontaminés est une voie prometteuse pour valoriser économiquement les friches industrielles délaissées tout en dépolluant les sols. Le projet SOLAMET a pour objectif de mettre en œuvre un démonstrateur d'agromine sur une friche industrielle contaminée en plomb (Pb), cadmium (Cd) et zinc (Zn) par des activités verrières afin de les recycler dans les procédés industriels actuels. Différents parcellaires ont été mis en place en privilégiant des associations culturales de plantes hyperaccumulatrices et non accumulatrices. Afin d'évaluer l'impact du procédé de phytoextraction, un diagnostic agro-environnemental a été réalisé en début et en fin de projet. La faible fertilité physique et chimique du site a nécessité une refonctionnalisation de l'horizon de surface. Les moyens mis en œuvre pour l'optimisation agronomique de la phytoextraction en conditions polymétalliques ont permis d'obtenir des rendements en biomasse corrects mais avec des rendements d'extraction du Zn et du Cd qui sont restés faibles avec toutefois une baisse significative de la teneur totale en Cd de l'horizon de surface. Le mode de gestion appliqué a également permis de maintenir un niveau élevé de biodiversité sur le site. L'extraction du zinc à partir de plantes hyperaccumulatrices est techniquement réalisable, toutefois le développement à long terme de l'agromine en milieu polycontaminé et à fortes contraintes apparaît limité.

Introduction

Les SUITMAs (sols de zones urbaines, industrielles, de trafic, minières et militaires) diffèrent considérablement de leurs homologues naturels en ce qui concerne leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques, leurs fonctions et leurs services. Ils sont généralement caractérisés par des propriétés physico-chimiques limitées comme une forte teneur en éléments grossiers, une faible capacité de rétention en eau ou une moindre fertilité associée à de plus ou moins fortes teneurs en polluants métalliques et/ou organiques [1–3]. Si l'accent a été souvent mis sur les impacts négatifs, des points de vue récents soulignent également leur capacité à fournir des fonctions et des services importants comme le support de la végétation, la purification de l'eau, le rôle de réserve de biodiversité ou encore le stockage de carbone [4].

La phytoremédiation rassemble diverses techniques de dépollution s'appuyant sur des solutions basées sur la nature pour limiter la migration des éléments en trace (ET) métalliques et métalloïdes au sein d'un écosystème. Parmi elles, la phytoextraction se distingue par son utilisation de plantes faiblement accumulatrices à forte biomasse et/ou de plantes hyperaccumulatrices, concentrant les ET dans leurs parties aériennes. Dans une filière intégrée, l'agromine consiste en la mise en œuvre de cultures de phytoextraction d'éléments d'intérêt industriel contenus dans une gamme large de ressources secondaires (sols, effluents, sédiments, sous-produits industriels) et leur récupération par les voies de la métallurgie [5]. La récupération des éléments d'intérêt contenus dans la biomasse est assurée par des procédés écoresponsables qui permettent la fabrication de composés de haute pureté [6]. Les plantes utilisées pour la phytoextraction doivent répondre à deux principaux critères : produire une biomasse suffisante et accumuler des concentrations élevées en ET [7]. Afin d'améliorer les rendements, diverses approches, de la microbiologie à la génétique en passant par la biologie végétale, sont actuellement à l'étude. La co-culture est envisagée comme une solution potentielle à cette problématique notamment de par leur rôle dans la protection contre les ravageurs, l'augmentation de la biomasse, et la réduction significative de la contamination métallique du sol [8,9]. En outre la co-culture s'inscrit dans les pratiques agroécologiques, et a déjà montré des effets positifs sur le maintien de la biodiversité globale [10] tout en permettant une amélioration des rendements des cultures [11,12].

Le projet SOLAMET a pour objectif d'élaborer un démonstrateur d'agromine de métaux contenus dans des sols contaminés afin de les recycler dans les procédés industriels actuels. Il cible des éléments à fort potentiel économique, comme le cobalt, et des

éléments de plus faible intérêt économique mais préoccupants en raison de leur impact environnemental, comme le Zn, le Pb et le Cd. L'agromine est alors envisagée, d'une part, dans sa vocation première de recyclage d'éléments à forte valeur et, d'autre part, dans une perspective de traitement du sol par phytoextraction tout en maintenant, voire améliorant, les services écosystémiques rendus par les sols contaminés. Les métaux récupérés sont destinés à l'industrie du cristal d'art, utilisatrice d'une gamme d'éléments nécessaires à la coloration des objets, souvent de très haute valeur commerciale. Une pré-étude a permis de sélectionner un crassier lorrain issu de l'activité verrière et permettant de mettre en valeur l'agromine comme un outil au service de l'économie circulaire locale.

Matériels et méthodes

les objectifs du projet SOLAMET se déclinent en quatre items distincts : (1) élaborer un démonstrateur d'agromine de métaux contenus dans des sols industriels afin de les recycler dans les procédés industriels actuels ; (2) concilier l'économie circulaire avec la préservation de la biodiversité des friches industrielles ; (3) apporter de nouvelles connaissances scientifiques sur les friches industrielles et le comportement de plantes hyperaccumulatrices de Pb, de Zn et de Cd associées en co-culture en dehors de leur milieu d'origine ; (4) développer des outils pour la phytoremédiation des sols co-contaminés en ET en respectant une démarche agro-écologique. Pour répondre à ces objectifs, le projet a été mené suivant le logigramme présenté en Figure 1.

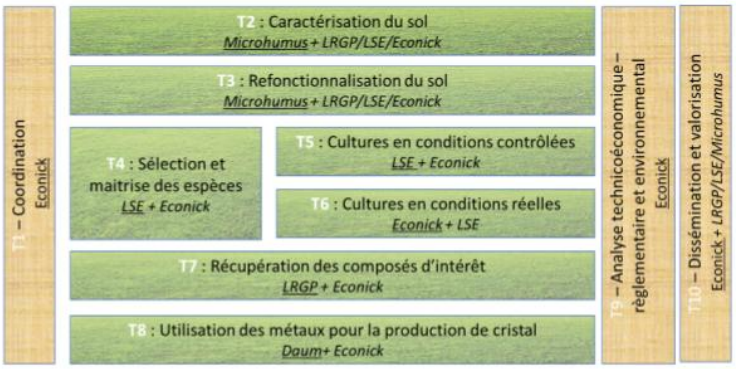

Figure 1 : Logigramme du projet SOLAMET

Le site étudié a été utilisé comme décharge pour les déchets de l'industrie du verre (fragments de verre, matériaux réfractaires et résidus de combustion du coke) sur une épaisseur de 10 m. Jusqu'à sa fermeture en 1990, il a reçu du Pb_3O_4, des déchets acides, des boues de neutralisation riches en Pb et des cristaux. Au cours des trente dernières années, une flore vasculaire spontanée et une entomofaune particulière ont colonisé cette friche, ce qui a contribué à recréer un écosystème bien végétalisé. Aujourd'hui, cette petite colline artificielle est recouverte d'une couche herbacée de 1200 m² à son sommet (environ 60 m de long et 20 m de large), entourée de pentes boisées.

Diagnostic agro-environnemental du site

La mise en place du plan d'échantillonnage initial a reposé sur le découpage du site en une grille de 35 parcelles de 25 m² au sein desquelles un composite de l'horizon de surface du sol (0-10 cm) a été prélevé pour les analyses. Les échantillons de sol ont fait l'objet d'analyse des paramètres agronomiques (pH eau, conductivité électrique, capacité d'échange cationique et cations échangeables et phosphore assimilable) ainsi que des teneurs pseudo-totales (extractibles à l'eau régale) et potentiellement disponibles (extractibles au DTPA) suivant des méthodes normalisées. Des analyses par diffraction X et par spectrométrie infra-rouge en réflexion diffuse ont été réalisées sur les fractions fines pour identifier les phases porteuses de métaux. Concernant le diagnostic écologique, plusieurs inventaires ont été réalisés en juillet 2019 sur la strate herbacée, située au sommet de la colline. L'identification des taxons végétaux a été réalisée jusqu'au niveau de l'espèce. Pour l'échantillonnage de l'entomofaune, un inventaire des communautés d'orthoptères et de lépidoptères diurnes a été réalisé pendant deux jours en juillet et août 2019. Afin d'évaluer l'impact des trois années successives d'agromine sur le site, un second diagnostic agro-environnemental a été réalisé en fin de projet dans des conditions similaires.

Conception des parcellaires d'agromine

Les résultats du diagnostic agro-environnemental et l'importante fraction grossière présente dans l'horizon de surface (70 à 80 % en masse) ont nécessité la refonctionnalisation du sol *via* un apport unique en octobre 2020 d'une couche de surface de 7 cm d'un amendement organique de production locale sur une surface de 350 m^2, soit environ 35 t/ha. Les essais de co-culture ont été mis en place huit mois après. Un système d'arrosage par aspersion a été installé sur la zone cultivée. Un premier démonstrateur d'agromine s'est étendu sur 225 m^2 au cœur de la parcelle herbacée centrale. Compte-tenu de la polycontamination en ET, une première association a été établie entre deux plantes hyperaccumulatrices de Cd et de Zn : *Noccaea caerulescens* population Ganges [13] et *Sedum plumbizincicola* [14]. Une légumineuse, *Anthyllis vulneraria*, a été intégrée à cette co-culture d'hyperaccumulateurs afin de recréer un microclimat plus frais et humide face aux sécheresses estivales dont peut souffrir l'hyperaccumulateur *N. caerulescens* et de participer à l'enrichissement du sol en azote, au bénéfice des plantes hyperaccumulatrices installées en co-culture avec elle. Le sol a été recouvert soit par une toile de paillage biodégradable, soit par un paillage végétal, afin de limiter le développement d'adventices et d'assurer une meilleure gestion du parcellaire. Deux densité de *N. caerulescens* ont été testées avec respectivement un et deux rangs de 10 plants par mètre linéaire avec un espacement de 10 cm de largeur. La culture a été menée sur deux années successives. Un deuxième parcellaire de 45 m^2 (3 parcelles de 15 m^2) a été conçu dans le but d'étudier l'effet de la densité de l'association de *N. caerulescens* et *S. plumbizincicola* sur le rendement de

phytoextraction avec trois densités testées. La deuxième année, une nouvelle association a été testée : *N. caerulescens* avec *Pelargonium capitatum* var. Attar of Roses pour son aptitude à accumuler le Pb [15,16].

Résultats et discussion

Potentiel du crassier pour la phytoextraction du Pb, du Zn et du Cd en contexte d'agromine

Figure 2 : Illustration du parcellaire d'agromine en septembre 2021

Les travaux de caractérisation ont montré que le sol du crassier était particulièrement complexe avec des phases porteuses des métaux difficiles à identifier. L'optimisation du système de culture a par ailleurs nécessité beaucoup de main d'œuvre et une irrigation rendue difficile par manque d'accès à une source d'eau. Par ailleurs, les fortes teneurs en éléments grossiers ont rendu le travail du sol impossible, ne permettant pas une implantation directe des cultures de plantes hyperaccumulatrices, ce qui a conduit à l'apport en surface d'une couche de compost de 7 cm. Enfin, le développement dense de la végétation spontanée a nécessité le décapage d'une couche de terre sur 10 cm. Ces caractéristiques, souvent rencontrées sur les SUITMAs, peuvent être des facteurs limitants pour le développement de l'agromine. Si l'ensemble de ces pratiques ont permis d'améliorer les propriétés physico-chimiques du sol et l'installation des cultures, elles ont également eu des impacts négatifs tels qu'une surfertilisation azotée pouvant conduire à l'émission de GES, une perte de biodiversité, une augmentation des teneurs totales en Cu et en Zn et une plus forte complexation de Pb et Zn dans le sol. Il en a résulté des rendements en biomasse tout à fait corrects (entre 1,1 et 1,6 t ha^{-1}) avec toutefois de faibles rendements d'extraction des métaux (5 à 50 g Cd ha^{-1} et 2,1 kg Zn ha^{-1} extraits au maximum). Les résultats des essais effectués avec *P. capitatum* cultivar Attar of Roses en conditions réelles sur le crassier ne révèlent aucune capacité de phytoextraction du Pb (4,2 mg kg^{-1} dans les parties aériennes), et cela en dépit d'une biodisponibilité potentielle élevée du Pb dans le sol. En moyenne, *P. capitatum* a accumulé deux fois moins de Pb que les espèces *S. plumbizincicola* ou *N. caerulescens* sur le terrain. Ces résultats contrastent fortement avec les quelques données de la littérature sur cette espèce qui indiquaient des teneurs pouvant dépasser 1000 mg kg^{-1} dans les parties aériennes de plantes cultivées sur des sites contaminés. Les faibles rendements d'extraction n'ont pas permis la valorisation des métaux issus de la biomasse par hydrométallurgie et les travaux dédiés à la récupération des métaux d'intérêt ont dû être réalisés sur des lots de biomasses en provenance d'autres sites. Il a toutefois pu être démontré que l'extraction du Zn à partir de plantes hyperaccumulatrices est techniquement réalisable avec un rendement supérieur à 60 % sur l'ensemble du procédé. La preuve du concept est d'ores et déjà établie, mais des optimisations sont encore possibles.

Diagnostics environnementaux

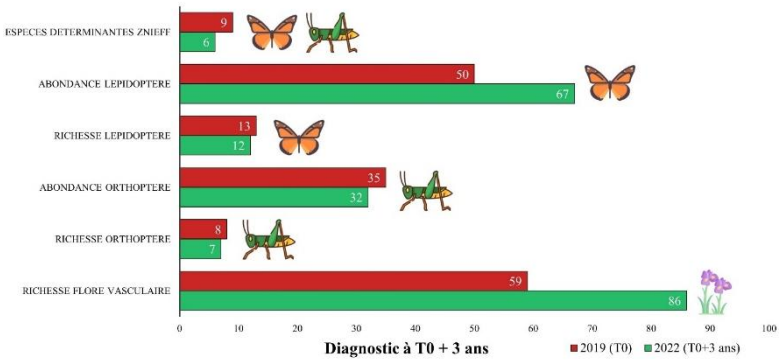

Figure 3 : Evolution de l'abondance et de la richesse spécifique de la flore vasculaire et de l'entomofaune de la strate herbacée après trois années de phytomanagement, à l'échelle du site.

Le diagnostic environnemental initial [17] montre que l'horizon de surface présente une forte contamination par le Pb (1800-3100 mg kg^{-1}) et le Cd (1,4-28,7 mg kg^{-1}) avec une fraction potentiellement biodisponible élevée (800-1300 mg Pb kg^{-1} et 0,4-3,4 mg Cd kg^{-1}). Toutefois, les concentrations en ET échangeables étaient toutes inférieures aux limites de quantification analytique. En outre, le site était caractérisé par une fertilité moyenne du sol. Concernant la biodiversité sur le site, elle s'est avérée substantiellement plus élevée que celle attendue, avec des assemblages d'orthoptères similaires à ceux des prairies et une diversité diurne de lépidoptères comparable à celle des parcs urbains. Nous avons également constaté une influence positive de la richesse végétale sur la structure de la communauté diurne de lépidoptères. D'après ces résultats, la contamination en ET ne semble pas être un facteur limitant primaire pour l'établissement de ces communautés.

Après trois années de phytomanagement, l'impact global de la mise en place de la phytoextraction sur la biodiversité du crassier, telle que mesurée, demeure relativement faible. Les principaux effets négatifs concernent la réduction du nombre d'espèces déterminantes pour les Zones Naturelles d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF), ainsi que la légère diminution des indices de biodiversité des lépidoptères diurnes et des orthoptères. En revanche, les pratiques adoptées dans le cadre du projet SOLAMET ont engendré une amélioration significative de la richesse spécifique de la flore vasculaire et de l'abondance des lépidoptères diurnes. Entre 2019 et 2022, les autres bio-indicateurs restent stables, notamment la richesse spécifique et les indices de Pielou des orthoptères et des lépidoptères diurnes, avec une très légère tendance à la baisse enregistrée. Les concentrations en Cd pseudo-totales et potentiellement disponibles mesurées en 2022 dans la zone investie par la co-culture d'hyperaccumulateurs

implantée sur le compost sont en moyenne cinq fois inférieures à celles de 2019. Si le décapage du sol avant culture et l'apport d'une couche épaisse de compost explique en partie cette baisse, la phytoextraction du Cd par *N. caerulescens* a efficacement décontaminé la zone investie par les cultures, après trois années de phytomanagement. En revanche, aucun effet significatif n'a pu être observé concernant les autres ET, voire les apports massifs de compost ont augmenté les quantités de Cu et de Zn tant pseudo-totales que potentiellement biodisponibles.

Recommandations pour la mise en œuvre de futurs projets d'agromine

Les études réalisées sur le crassier mettent en évidence plusieurs considérations essentielles. Avant d'entreprendre toute action dans un projet de phytomanagement, une analyse approfondie du terrain est impérative afin de définir les limites et les contraintes spécifiques du site. Il est indispensable d'appréhender chaque terrain de manière unique, en prenant en compte l'ensemble des éléments c'est-à-dire concilier le potentiel agro-environnemental du terrain (nature des sols et biodiversité des écosystèmes) avec les objectifs de phytoremédiation (et de la phytoextraction spécifiquement). Cela implique une étude de faisabilité préalable pour anticiper et résoudre les défis potentiels. Dans le cadre des SUITMAs, un compromis est nécessaire dans l'optimisation des fertilités physiques et chimiques des sols polycontaminés. Il est très important de prendre en compte la dimension de la fertilité physique du sol, qui couplée à la surface du chantier, permet de déterminer les techniques à employer que ce soit *via* la mécanisation ou le travail manuel. Le projet SOLAMET a mis en évidence que la mécanisation aurait été préférable à partir de surfaces supérieures à 100 m² (ordre de grandeur). La biodiversité initialement présente sur le site est également un élément crucial à considérer. Si le sol est pauvre en éléments nutritifs pour les organismes, la phytoextraction à l'aide de co-cultures notamment entre des légumineuses (e.g. *A. vulneraria*, *Lupinus albus*, *Vicia sativa*) et des hyperaccumulateurs, peut le rendre plus fertile et permettre un abattement des concentrations en Pb, en Zn et en Cd, diminuant la toxicité du sol et favorisant ainsi la réimplantation de la végétation spontanée, de la faune et de la microflore du sol. En revanche, sur les sites présentant déjà une biodiversité élevée, il convient de minimiser l'impact des interventions sur la richesse des communautés floristiques et faunistiques pour atteindre au minimum une perte nulle de biodiversité, voire une amélioration de la biodiversité préexistante. Enfin, le climat est un facteur essentiel à prendre en compte. Il est nécessaire d'adapter les choix des espèces végétales (plantes pérennes, rustiques, indigènes…), le système de recouvrement du sol, et l'irrigation en fonction du climat, en anticipant les fortes chaleurs ou les températures négatives (mise en place d'un voile d'hivernage). Ainsi une approche multidimensionnelle est nécessaire pour concevoir et réaliser un projet d'agromine.

Conclusions et perspectives

Malgré tous les moyens mis en œuvre pour l'optimisation agronomique de la phytoextraction en conditions polymétalliques sur le crassier, les rendements d'extraction du Zn et du Cd restaient faibles. En conclusion, le potentiel de phytoextraction du Pb, du Zn et du Cd apparaît comme limité sur des SUITMAs analogues au crassier industriel en friche étudié dans le cadre du projet SOLAMET. D'autres voies de valorisation seraient plus pertinentes pour le phytomanagement de sites comparables au crassier. Tout d'abord il est possible de laisser le site en libre évolution, en atténuation naturelle, afin de limiter l'impact des pratiques anthropiques sur la biodiversité [17]. Néanmoins d'autres pistes sont aussi envisageables comme la phytostabilisation pour limiter l'envol de poussières riches en ETMM, l'implantation d'espèces ligneuses en agroforesterie, ou l'installation de panneaux photovoltaïques. Finalement le potentiel de phytoextraction ou d'agromine du Pb, du Zn et du Cd semble plus élevé sur d'autres anthroposols contaminés tels que des jardins ou des sols agricoles, ou même sur d'autres friches urbaines ou industrielles présentant moins de freins au niveau de leur fertilité physico-chimique et moins de contraintes pratiques (irrigation, taux de recolonisation par la végétation spontanée élevé, déplacements).

Références

1. Hostyn, G., Schwartz, C., Côme, J.-M. & Ouvrard, S. Assessment for combined phytoremediation and biomass production on a moderately contaminated soil. *Environ Sci Pollut Res* **29**, 59736–59750 (2022).
2. Joimel, S. *et al.* Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality. *Sci Total Environ* **584–585**, 614–621 (2017).
3. Vincent, Q., Auclerc, A., Beguiristain, T. & Leyval, C. Assessment of derelict soil quality: Abiotic, biotic and functional approaches. *Sci Total Environ* **613–614**, 990–1002 (2018).
4. Morel, J. L., Chenu, C. & Lorenz, K. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *J Soils Sediments* **15**, 1659–1666 (2015).
5. *Agromining: Farming for Metals. Extracting Unconventional Resources Using Plants. Second Edition*. (Springer Berlin Heidelberg, Cham, 2021).
6. Simonnot, M. O., Vaughan, J. & Laubie, B. Processing of bio-ore to products. in *Agromining: Farming for Metals* (eds. Van der Ent, A., Echevarria, G., Baker, A. & Morel, J. L.) 39–52 (Cham, 2018).
7. Kidd, P. *et al.* Agronomic Practices for Improving Gentle Remediation of Trace Element-Contaminated Soils. *Int J Phytorem* **17**, 1005–1037 (2015).
8. Whiting, S. N., Leake, J. R., McGrath, S. P. & Baker, A. J. M. Hyperaccumulation of Zn by *Thlaspi caerulescens* Can Ameliorate Zn Toxicity in the Rhizosphere of Cocropped *Thlaspi arvense*. *Environ Sci Technol* **35**, 3237–3241 (2001).
9. Fuksova, Z., Szakova, J. & Tlustos, P. Effects of co-cropping on bioaccumulation of trace elements in *Thlaspi caerulescens* and *Salix dasyclados*. *Plant Soil Environ* **55**, 461–467 (2009).
10. Dainese, M. *et al.* A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Sci Adv* **5:eaax0121**, 1–13 (2019).
11. Saad, R. F. *et al.* Crop rotation associating a legume and the nickel hyperaccumulator *Alyssum murale* improves the structure and biofunctioning of an ultramafic soil. *Ecol Res* (2018) doi:10.1007/s11284-017-1526-4.

12. Saad, R. F., Echevarria, G., Rodríguez-Garrido, B., Kidd, P. & Benizri, E. A two-year field study of nickel-agromining using *Odontarrhena chalcidica* co-cropped with a legume on an ultramafic soil: temporal variation in plant biomass, nickel yields and taxonomic and bacterial functional diversity. *Plant Soil* **461**, 471–488 (2021).
13. Gonneau, C., Genevois, N., Frérot, H., Sirguey, C. & Sterckeman, T. Variation of trace metal accumulation, major nutrient uptake and growth parameters and their correlations in 22 populations of *Noccaea caerulescens*. *Plant Soil* **384**, 271–287 (2014).
14. Zhou, T. *et al.* Repeated phytoextraction of metal contaminated calcareous soil by hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*. *Int J Phytorem* **20**, 1243–1249 (2018).
15. Arshad, M. *et al.* A field study of lead phytoextraction by various scented *Pelargonium* cultivars. *Chemosphere* **71**, 2187–2192 (2008).
16. Arshad, M. *et al.* Phytoavailability of lead altered by two *Pelargonium* cultivars grown on contrasting lead-spiked soils. *J Soils Sediments* **16**, 581–591 (2016).
17. Jacquet, J., Benizri, E., Echevarria, G. & Sirguey, C. New insights on glass industry wasteland ecosystems. *Environ Pollut* **315**, 120431 (2022).

Remerciements

Ces travaux ont été soutenus par la convention ADEME N°1972C0020 et la convention ANRT Cifre N°2019/1926. Ils sont inclus dans le programme scientifique du Consortium de recherche GISFI dédié à la connaissance et au développement des technologies de requalification des territoires dégradés (http://www.gisfi.univ-lorraine.fr).